

تحليل اجزا محدود و بهينه‌سازى مدل با استفاده از ABAQUS و MATLAB

جلد اول

ترجمه و تالیف

آرش رستمی



نشر علم عمران

www.elme-omran.com
Info@elme-omran.com

عضو:



انجمن مهندسان مکانیک ایران

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه	: رستمی، آرش، ۱۳۶۸ -
عنوان و نام پدیدآور	: تحلیل اجزا محدود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از matlab و abaqus / ترجمه و تالیف آرش رستمی .
مشخصات نشر	: تهران : علم عمران ، ۱۳۹۶ -
مشخصات ظاهری	: ج. : مصور ، جدول ، نمودار .
شابک	: ۳۹۰۰۰۰ ریال ج. ۱ ۱-۳۹-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸؛ ۱۲۰۰۰۰۰ ریال: دوره ۷-۴۰-۵۷۷۶-۶۰۰-۹۷۸:
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
موضوع	: روش المان‌های محدود -- نرم‌افزار، آباکوس، متلب
موضوع	: Finite elements method -- Software MATLAB , Abaqus (Electronic resource)
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۶ ر ۵ / ۳۴۷ / TA
رده بندی دیویی	: ۶۲۰ / ۰۱۵۱۸۲۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۹۳۸۳۳۷



نشر علم عمران

تحلیل اجزا محدود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از ABAQUS و MATLAB (جلد اول)
ترجمه و تالیف: آرش رستمی

چاپ اول	پاییز ۱۳۹۶
چاپ	پرستش
تعداد و قطع صفحات	۵۶۸ صفحه وزیری
شمارگان	۱۰۰۰
بهای کتاب	۳۹۰۰۰۰ ریال
شابک دوره ۷-۴۰-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸	ISBN 978-600-5176-40-7
شابک ۱-۳۹-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸	ISBN 978-600-5176-39-1

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان‌آرا، بین خیابانهای ۱۶ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱

تلفن: ۰۲۱-۸۸۳۵۳۹۳۰-۳۱ دورنگار: ۸۸۳۵۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

زندگی صحنه یکتای هنرمندی ماست

هرکسی نغمه خود خواند و از صحنه رود

صحنه پیوسته به جاست

خرم آن نغمه که مردم بسیار ندیده یاد...

با توجه به سرمایه گذاری شخصی در چاپ کتاب کلیه درآمدها حاصل از فروش کتب
به موسسات خیریه «حمایت از بیماران کلیوی» و «مهرانه» اهدا می گردد.

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت، از رفتارشان محبت و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

آرش رستمی

مقدمه

در حال حاضر در دنیای مهندسی یکی از روش‌های حل معادلات و مسائل در حوزه‌های مختلف روش‌های عددی من جمله المان محدود و یا اجزاء محدود می‌باشد، که به سرعت در حال گسترش هستند. در این راستا نرم‌افزارهای متعددی توسط دانشمندان، محققان و شرکت‌های تجاری تولید و روانه بازار شده‌اند، ولی در این میان می‌توان گفت که نرم‌افزار Abaqus به حق جز یکی از بهترین نرم‌افزارهای حال حاضر در این عرصه می‌باشد. این نرم‌افزار اولین بار ۱۹۸۷ به بازار آمد و از آن پس تا کنون ورژن‌های متعددی از آن در اختیار کاربران قرار گرفته است. Abaqus در زبان لاتین به معنی چرتکه می‌باشد. از ویژگی‌های منحصر به فرد نرم‌افزار Abaqus، به روز شدن آن، اضافه شدن ماژول‌ها و حلگرهای مختلف به این نرم‌افزار در کنار کدنویسی و برنامه پایتون به حق این نرم‌افزار را سرآمد دیگر محصولات موجود کرده است. با توجه به اینکه اکثر پژوهش‌های مقاطع کارشناسی ارشد، دکتری و حتی دوره کارشناسی نیازمند نرم‌افزارهای عددی و تحلیلی می‌باشد، این نرم‌افزار قادر است در اکثر رشته‌ها پاسخگوی نیاز محققین باشد. این نرم‌افزار با توجه به باور اکثر کاربران یک نرم‌افزار مخصوص مهندسين می‌باشد، این در حالی است که کاربردها و استفاده‌های علوم دیگر همچون پزشکی قدرت و قابلیت این نرم‌افزار را یک سر و گردن از دیگر نمونه‌های موجود نشان می‌دهد. این نرم‌افزار در حال حاضر به طور کامل محصول مشابه خود یعنی نرم‌افزار انسیس را از رده خارج کرده و تمایل محققان به این محصول را بیشتر کرده است. از سوی دیگر با توجه به اینکه آباکوس قابلیت برنامه‌نویسی و کدنویسی را نیز دارا می‌باشد محصول جایگزین این نرم‌افزار به نظر بنده تا چندین سال بعد نیز قدرت عرض اندام در مقابل این نرم‌افزار را نخواهد داشت. جدا از ویژگی‌های مطرح شده برای این محصول، قدرت محاسباتی و دقت بسیار بالا در نتایج قابلیت مدل کردن رفتارهای مختلف مواد مانند فلزات، مواد منفجره، کامپوزیت‌ها، سیالات، بتن مسلح، خاک، پلاستیک‌ها، فوم‌ها و حتی اعضای بدن موجب گسترش و محبوبیت این نرم‌افزار در میان دانشجویان محققین و اساتید شده است.

کتابی که پیش روی شماست یکی از ۳ جلد و اولین جلد از این سری می‌باشد. این کتاب جلد اول از مجموعه سری «تحلیل اجزاء محدود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از Abaqus و MATLAB» می‌باشد. خوشبختانه در حال حاضر کتب بسیار مفید و ارزشمندی توسط اساتید و محققین در مورد نرم‌افزار Abaqus در میهن عزیزمان نگارش شده که به حق دارای محتوای مناسب و کاربردی می‌باشند. این سری کتب کاملاً متفاوت از دیگر آثار موجود بوده و اندکی قدم فراتر نهاده و به لینک و ادغام چند نرم‌افزار پرداخته است. این سری ویژگی‌های متمایزی نسبت به دیگر آثار دارد و در واقع در مورد کدنویسی در Abaqus و MATLAB و در جلد سوم کدنویسی در Abaqus، MATLAB و Python و ادغام آن‌ها جهت افزایش سرعت محاسبات و نیز انجام برخی تحلیل‌های خاص پرداخته است. جلد اول و فی‌الواقع کتاب حاضر بر اساس کتاب آقای عمار خان بنا نهاده شده و به همین دلیل جلد سری کتب نیز بر این اساس طراحی

گردیده است. جلد اول مقدمه و گام ابتدایی در راستای اهداف سری کتب می‌باشد. در جلد اول خواننده با اصول اولیه و ابتدایی کدنویسی دستورات Abaqus در MATLAB آشنا می‌شود. با توجه به تمرکز این سری بر نرم‌افزار آباکوس توصیه می‌شود خواننده قبل از مطالعه این سری آشنایی و مهارت لازم را در مورد نحوه کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB کسب نماید. این جلد مقدمات و اصول پایه را برای خواننده شرح داده و کاربر را برای مجلدهای بعدی که مباحث تکمیلی و سنگین‌ارایه می‌شوند آماده می‌نماید. در جلد دوم و سوم که به ترتیب مرحله پیشرفته و حرفه‌ای می‌باشند، کدنویسی و مدلسازی را بر اساس اصول بهینه‌سازی و الگوهای متداول و خاص بهینه‌سازی از جمله الگوی شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک کدهایی همچون زنبور عسل، کرم شب تاب و... شرح داده شده و لینک‌ها و کدهای مرتبط به تفصیل بیان شده تا خواننده بتواند به واسطه این کدها در برخی از مدلسازی‌ها که قابلیت بهینه‌کردن مدل در آن‌ها وجود دارد کار خود را پیش ببرد. در جلد سوم و مرحله حرفه‌ای گام را اندکی بیشتر فرا نهاده‌ایم و سه نرم‌افزار Python، Abaqus، MATLAB را آموزش داده‌ایم. مباحث بیان شده در این سه جلد و به خصوص جلد دوم و سوم به گونه ایست که کاملاً دانشجویان مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری و نیز فوق دکتری با توجه به اهمیت موضوع بهینه‌سازی را کاملاً اقناع می‌نماید. همچنین با امید به ایزد منان این سری تا اواسط سال ۲۰۱۷ میلادی به زبان انگلیسی نیز چاپ خواهند شد.

در پایان لازم می‌دانم از آقای مهندس عرفانی بابت پیشنهاد انجام این آثار تشکر کنم و نیز از دفتر فنی پایتخت (فولادی) که زحمت تایپ را بر عهده گرفتند و نیز خانم سارا رستمی (کانون تبلیغاتی نقش‌واره) که زحمت طراحی جلد و صفحه‌آرایی کتاب را تقبل کردند تشکر و قدردانی نمایم و همچنین از دوستانم که اجازه دادند مقدمه این اثر به نگارش بنده باشد.

آرش رستمی بهار ۱۳۹۵

مقدمه چاپ و ویرایش دوم

به نام یگانه مهندس گیتی

نرم افزار قدرتمند ABAQUS در سال های اخیر با سرعت زیادی اکثر رقبای خود را کنار زد و هم اکنون به عنوان اولین و مورد قبول ترین نرم افزار اجزا محدود در سرتاسر جهان شناخته می شود. این نرم افزار با توجه به ورژن های اخیر که وارد بازار شده و نیز قابلیت کدنویسی و نیز روش های حل که به آن افزوده شده بی شک محصولی بی رقیب در بازار می باشد. کتاب «تحلیل اجزا محدود و بهینه سازی مدل با استفاده از MATLAB و ABAQUS» اولین جلد از کتاب سه جلدی با همین عنوان می باشد. جلد اول این کتاب با استقبال خوبی در جامعه دانشجویی و دانشگاهی قرار گرفت و توانست در مدت کوتاهی به فروش رسیده و مخاطبان را با سرفصل های جدیدی آشنا نماید. ویرایش دوم و نیز چاپ دوم جلد اول بدون تغییر همان مطالب جلد اول و ویرایش اول کتاب می باشد.

ولی در مورد دو جلد بعدی با توجه به استقبال خوانندگان نویسنده را به شدت به تکاپو انداخت تا مطالب بسیار جدید و متفاوتی را که تا کنون در هیچ کتاب، مقاله، سایت و منبعی معرفی نشده به علاقه مندان ارائه دهد. جلد دوم و سوم مختص اساتید و دانشجویانی است که علاقه مند کارهای پژوهشی هستند و تخصص آنها بهینه سازی مدل و مدلسازی می باشد. در جلد دوم و سوم که به امید خداوند متعال به جد در حال تهیه آن هستم تا انتهای سال ۹۶ به بازار عرضه خواهد شد و یقین دارم با توجه به سرفصل ها و مطالب بسیار جدیدی که کاملاً برگرفته از مقالات و پژوهش های سال های اخیر محققین مطرح دنیا در رشته های عمران، مکانیک، هوافضا، برق و متالوژی می باشد، دانشجویان اساتید و محققان کشور عزیزم را کمک شایان توجهی در راستای ارائه پژوهش های بسیار نوآورانه خواهد داشت. از سمتی چون چنین کتابی در دیگر مراجع خارج از کشور نیز وجود ندارد ترجمه همزمان دو جلد بعدی نیز در حال انجام می باشد تا به صورت هم زمان اثر به دو زبان فارسی و انگلیسی به چاپ برسد. دوستانی در تهیه این اثر و در مدت تدوین آن این بنده حقیر را مساعدت نمودند که جای دارد از همین جا از این عزیزان تشکر و قدردانی نمایم. سرکار خانم فولادی (دفتر فنی پایتخت) بابت قبول زحمت تایپ، سرکار خانم رستمی (کانون تبلیغاتی نقش واره) بابت صفحه آرایی و دوست و همکار عزیز جناب آقای دکتر داودنوبی مدیر مسوول انتشارات علم عمران که در تهیه اثر کمتر از بنده حقیر تلاش نمودند. از خوانندگان عزیز تقاضا دارم انتقادات پیشنهادات و نقطه نظرات خود را در خصوص کتاب به آدرس ایمیل Civil.Rostami.Books@gmail.com ارسال نمایند تا در ویرایش های بعدی لحاظ گردد. همچنین در وبسایت شخصی اینجانب به آدرس www.ArashRostami.com نیز مطالب مرتبط و به روز شده در دسترس عزیزان می باشد.

آرش رستمی

مهرماه ۱۳۹۶

فهرست مطالب

۱۹	مقدمه
۲۱	فصل اول معرفی
۲۳	پیش‌گفتار
۲۳	تحلیل اجزاء محدود و کاربر
۲۴	هدف از نگارش کتاب
۲۵	ساختار کتاب
۲۷	فصل دوم المان میله‌ای
۲۹	۱-۲ مقدمه
۲۹	۲-۲ المان یک بعدی خرپا
۲۹	۱-۲-۲ فرمول بندی ماتریس سختی: روش مستقیم
۳۲	۲-۲-۲ المان خرپای دو بعدی
۳۵	۳-۲ تجمیع ماتریس سختی کل
۳۵	۱-۳-۲ گسسته‌سازی
۳۵	۲-۳-۲ ماتریس‌های سختی المان‌ها در مختصات محلی
۳۷	۳-۳-۲ ماتریس‌های سختی المان‌ها در مختصات کلی
۳۷	۱-۳-۳-۲ المان ۱
۳۷	۲-۳-۳-۲ المان ۲
۳۸	۳-۳-۳-۲ المان ۳
۳۹	۴-۳-۲ اسمبل ماتریس کلی
۳۹	۱-۴-۳-۲ فقط المان ۱ وجود دارد
۴۰	۲-۴-۳-۲ فقط المان ۲ وجود دارد
۴۰	۳-۴-۳-۲ فقط المان ۳ وجود دارد
۴۰	۵-۳-۲ اسمبل بردار نیروی کلی
۴۱	۴-۲ شرایط مرزی
۴۱	۱-۴-۲ مورد کلی
۴۳	۵-۲ راه حل سیستم معادلات
۴۴	۶-۲ واکنش‌های تکیه‌گاهی
۴۴	۷-۲ نیروهای اعضا
۴۶	۸-۲ برنامه کامپیوتری: Truss.m

۴۷	۱-۸-۲ آماده‌سازی داده‌ها
۴۷	۱-۱-۸-۲ مختصات گره‌ها
۴۷	۲-۱-۸-۲ اتصال المان‌ها
۴۷	۳-۱-۸-۲ خواص ماده‌ای و هندسی
۴۷	۴-۱-۸-۲ شرایط مرزی
۴۸	۵-۱-۸-۲ بارگذاری
۴۹	۲-۸-۲ ماتریس‌های المان
۴۹	۱-۲-۸-۲ ماتریس سختی در مختصات محلی
۴۹	۲-۲-۸-۲ ماتریس تبدیل
۴۹	۳-۲-۸-۲ ماتریس سختی در مختصات کلی
۵۰	۴-۲-۸-۲ بردار «راهنما»
۵۰	۳-۸-۲ اسمبل ماتریس سختی کلی
۵۰	۴-۸-۲ اسمبل بردار نیروی کلی
۵۰	۵-۸-۲ حل معادلات سیستم کلی
۵۱	۶-۸-۲ جابجایی‌های گره‌ای
۵۱	۷-۸-۲ نیروهای المان
۵۲	۸-۸-۲ اسکریپت برنامه
۵۴	۹-۲ مسایل
۵۴	۱-۹-۲ مسئله ۱-۲
۶۰	۲-۹-۲ مسئله ۲-۲
۶۳	۱۰-۲ تحلیل یک نمونه خریا با استفاده از ABAQUS
۶۳	۱-۱۰-۲ مروری بر ABAQUS
۶۵	۲-۱۰-۲ تحلیل یک خریا با استفاده از نسخه تعاملی ABAQUS
۶۵	۱-۲-۱۰-۲ مدل‌سازی
۶۵	۲-۲-۱۰-۲ تحلیل
۹۲	۳-۱۰-۲ تحلیل خریا با ویرایش نسخه کلمات کلیدی Abaqus KEYWORD
۹۹	فصل سوم المان تیر
۱۰۱	۱-۳ مقدمه
۱۰۲	۲-۳ ماتریس سختی
۱۰۶	۳-۳ بارگذاری یکنواخت توزیع شده
۱۱۰	۴-۳ مفاصل داخلی

۱۱۲	۵-۳ برنامه کامپیوتری: beam.m
۱۱۲	۱-۵-۳ آماده سازی داده‌ها
۱۱۲	۱-۱-۵-۳ مختصات گره‌ها
۱۱۳	۲-۱-۵-۳ اتصال المان‌ها
۱۱۳	۳-۱-۵-۳ ویژگی‌های هندسی و مواد
۱۱۳	۴-۱-۵-۳ شرایط مرزی
۱۱۴	۵-۱-۵-۳ مفاصل داخلی
۱۱۴	۶-۱-۵-۳ اعمال بارگذاری
۱۱۵	۷-۱-۵-۳ ماتریس سختی
۱۱۶	۲-۵-۳ اسمبل سیستم کلی معادلات
۱۱۶	۳-۵-۳ جابجایی‌های گره‌ای
۱۱۶	۴-۵-۳ نیروهای المان‌ها
۱۲۱	۶-۳ مسایل
۱۲۱	۱-۶-۳ مسئله ۱-۳
۱۲۴	۲-۶-۳ مسئله ۲-۳
۱۲۷	۳-۶-۳ مسئله ۳-۳
۱۳۰	۷-۳ تحلیل یک تیر ساده با آباکوس
۱۳۰	۱-۷-۳ نسخه تعاملی
۱۴۳	۲-۷-۳ تحلیل یک تیر با نسخه کلمات کلیدی آباکوس
۱۴۷	فصل چهارم قاب‌های مفصلی صلب
۱۴۹	۱-۴ مقدمه
۱۴۹	۲-۴ ماتریس سختی یک المان تیر-ستون
۱۴۹	۳-۴ ماتریس سختی المان تیر-ستون در حضور انتهای مفصلی
۱۵۰	۴-۴ سیستم‌های مختصات محلی و کلی
۱۵۱	۵-۴ اسمبل و حل ماتریس سختی کلی برای جابجایی‌های مجهول
۱۵۱	۶-۵ برنامه کامپیوتری: frame.m
۱۵۱	۱-۶-۴ آماده‌سازی داده‌ها
۱۵۲	۱-۱-۶-۴ مختصات گره‌ها
۱۵۲	۲-۱-۶-۴ اتصال المان‌ها
۱۵۲	۳-۱-۶-۴ ویژگی‌های خواص هندسی و ماده‌ای
۱۵۲	۴-۱-۶-۴ شرایط مرزی

۱۵۳	۴-۶-۱-۵ مفاصل داخلی
۱۵۳	۴-۶-۱-۶ بارگذاری
۱۵۴	۴-۶-۲ ماتریس‌های المان
۱۵۴	۴-۶-۱-۱ ماتریس سختی با مختصات محلی
۱۵۵	۴-۶-۲-۲ ماتریس تبدیل
۱۵۵	۴-۶-۳-۳ ماتریس سختی در مختصات کلی
۱۵۵	۴-۶-۲-۴ بردار «راهنما»
۱۵۵	۴-۶-۲-۵ بارهای المان
۱۵۶	۴-۶-۳ اسمبل ماتریس سختی کلی
۱۵۶	۴-۶-۴ راه حل سیستم کلی معادلات
۱۵۶	۴-۶-۵ جابجایی‌های گره‌ای
۱۵۶	۴-۶-۶ نیروهای المان
۱۶۷	۴-۷-۷ تحلیل یک قاب ساده با آباکوس
۱۶۷	۴-۷-۱ نسخه تعاملی
۱۷۶	۴-۷-۲ نسخه کلمه کلیدی
۱۷۹	فصل پنجم تحلیل تنش و کرنش
۱۸۱	۵-۱ مقدمه
۱۸۱	۵-۲ تانسور تنش
۱۸۱	۵-۲-۱ تعریف
۱۸۳	۵-۲-۲ روابط بین بردار تنش - تانسور تنش
۱۸۵	۵-۲-۳ تبدیل تانسور تنش
۱۸۶	۵-۲-۴ معادلات تعادل
۱۸۷	۵-۲-۵ تنش‌های اصلی
۱۸۸	۵-۲-۶ تنش فون مایس
۱۸۹	۵-۲-۷ اجزای نرمال و تانژانتی بردار تنش
۱۹۰	۵-۲-۸ دایره موهر برای تنش
۱۹۱	۵-۲-۹ نمایش مهندسی تنش
۱۹۲	۵-۳ تغییرشکل و کرنش
۱۹۲	۵-۳-۱ تعریف
۱۹۳	۵-۳-۲ تعارف لاگرانژی و اویلری
۱۹۴	۵-۳-۳ جابجایی

۱۹۵	۴-۳-۵ شیب‌های جابجایی و تغییرشکل
۱۹۷	۵-۳-۵ ماتریس کرنش لاگرانژ گرین
۱۹۹	۶-۳-۵ تئوری تغییرشکل کوچک
۱۹۹	۱-۶-۳-۵ کرنش بی‌نهایت کوچک
۲۰۰	۲-۶-۳-۵ تفسیر هندسی عبارات تانسور کرنش
۲۰۲	۳-۶-۳-۵ شرایط سازگاری
۲۰۲	۷-۳-۵ کرنش‌های اصلی
۲۰۲	۸-۳-۵ تبدیل تانسور کرنش
۲۰۳	۹-۳-۵ نمایش مهندسی کرنش
۲۰۴	۴-۵ روابط ساختاری تنش-کرنش
۲۰۴	۱-۴-۵ قانون کلی هوک
۲۰۵	۲-۴-۵ تقارن‌های ماده‌ای
۲۰۵	۱-۲-۴-۵ تقارن با توجه به صفحه
۲۰۷	۲-۲-۴-۵ تقارن با توجه به صفحات متعامد یا عمود بر هم
۲۰۷	۳-۲-۴-۵ تقارن چرخشی با توجه به یک محور
۲۰۸	۳-۴-۵ ماده ایزوتروپیک
۲۱۰	۱-۳-۴-۵ مدول الاستیسیته
۲۱۰	۲-۳-۴-۵ نسبت پواسون
۲۱۰	۳-۳-۴-۵ مدول برشی
۲۱۱	۴-۳-۴-۵ مدول حجمی
۲۱۲	۴-۴-۵ تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای
۲۱۴	۵-۵ مسایل حل شده
۲۱۴	۱-۵ مسئله ۱-۵-۵
۲۱۴	۲-۵ مسئله ۲-۵-۵
۲۱۷	۳-۵ مسئله ۳-۵-۵
۲۱۸	۴-۵ مسئله ۴-۵-۵
۲۲۰	۵-۵ مسئله ۵-۵-۵
۲۲۱	۶-۵ مسئله ۶-۵-۵
۲۲۲	۷-۵ مسئله ۷-۵-۵
۲۲۴	۸-۵ مسئله ۸-۵-۵
۲۲۷	فصل ششم روش‌های باقیمانده وزنی

۲۲۹	۱-۶ مقدمه
۲۲۹	۲-۶ فرمولاسیون کلی
۲۳۰	۳-۶ روش گالریکین
۲۳۳	۴-۶ شکل ضعیف
۲۳۴	۵-۶ انتگرال گیری بر حسب بخش در دو بعدی‌ها و سه بعدی‌ها (قضیه گرین)
۲۳۹	۶-۶ روش ریلیق ریتز
۲۳۹	۱-۶-۶ تعریف
۲۳۹	۲-۶-۶ شکل تابعی مربوط به شکل انتگرالی
۲۴۰	۳-۶-۶ روش رایلی ریتز
۲۴۲	۴-۶-۶ نمونه‌هایی از اشکال تابع طبیعی
۲۴۹	فصل هفتم تقریب المان محدود
۲۵۱	۱-۷ مقدمه
۲۵۱	۲-۷ تقریب‌های کلی و گره‌ای
۲۵۳	۳-۷ تقریب المان محدود
۲۵۶	۴-۷ اصول پایه برای ساخت توابع آزمایشی
۲۵۶	۱-۴-۷ اصل سازگاری
۲۵۷	۲-۴-۷ اصل تمامیت
۲۵۸	۵-۷ تقریب المان محدود دو بعدی
۲۵۸	۱-۵-۷ المان سه گوش خطی مسطح برای مسایل C
۲۵۸	۱-۱-۵-۷ توابع شکل
۲۶۱	۲-۱-۵-۷ المان مرجع
۲۶۴	۳-۱-۵-۷ مختصات ناحیه‌ای
۲۶۶	۲-۵-۷ المان چهارضلعی خطی برای مسایل C
۲۶۶	۱-۲-۵-۷ تبدیل هندسی
۲۶۹	۲-۲-۵-۷ نوشتن تابع آزمایشی بر المان چهارضلعی خطی
۲۶۹	۶-۷ توابع شکلی برخی المان‌های کلاسیک یا سختی برای مسایل C
۲۶۹	۱-۷-۶ المان‌های تک-بعدی
۲۶۹	۱-۱-۷-۶ المان خطی دو گره‌ای
۲۷۰	۲-۱-۷-۶ المان درجه دوم سه گره‌ای
۲۷۰	۲-۷-۶ المان‌های دو-بعدی
۲۷۰	۱-۲-۷-۶ چهارضلعی دو سویه چهار گره‌ای

۲۷۱	۶-۷-۲ چهارضلعی درجه دوم هشت گره‌ای
۲۷۱	۶-۷-۳ مثلث خطی سه گره‌ای
۲۷۱	۶-۷-۴ مثلث درجه دوم شش گره‌ای
۲۷۲	۶-۷-۳ المان‌های سه-بعدی
۲۷۲	۶-۷-۱-۳ چهارضلعی خطی چهار گره‌ای
۲۷۲	۶-۷-۲-۳ چهارضلعی درجه دوم ده گره‌ای
۲۷۲	۶-۷-۳-۳ المان مکعب خطی هشت گره‌ای
۲۷۳	۶-۷-۴-۳ المان مکعبی درجه دوم بیست گره‌ای
۲۷۵	فصل هشتم انتگرال‌گیری عددی
۲۷۷	۸-۱ مقدمه
۲۷۷	۸-۲ مربع سازی گاوس
۲۸۰	۸-۲-۱ انتگرال‌گیری در فاصله قراردادی [a,b]
۲۸۱	۸-۲-۲ انتگرال‌گیری در دو بعدی‌ها و سه بعدی‌ها
۲۸۳	۸-۳ انتگرال‌گیری در یک المان مرجع
۲۸۴	۸-۴ انتگرال‌گیری در یک المان مثلثی
۲۸۴	۸-۴-۱ فرمول‌های ساده
۲۸۵	۸-۴-۲ انتگرال‌گیری عددی در یک المان سه ضلعی
۲۸۶	۸-۵ مسایل حل‌شده
۲۸۶	۸-۵-۱ مسئله ۱-۸
۲۸۸	۸-۵-۲ مسئله ۲-۸
۲۹۴	۸-۵-۳ مسئله ۳-۸
۳۰۱	فصل نهم مسایل صفحه‌ای
۳۰۳	۹-۱ مقدمه
۳۰۴	۹-۲ فرمول‌بندی المان محدود برای مسایل صفحه‌ای
۳۰۷	۹-۳ گسسته سازی فضایی
۳۰۹	۹-۴ مثلث کرنشی ثابت
۳۰۹	۹-۴-۱ حوزه جابجایی
۳۱۰	۹-۴-۲ ماتریس کرنش
۳۱۰	۹-۴-۳ ماتریس سختی
۳۱۱	۹-۴-۴ بردار نیروی المان
۳۱۱	۹-۴-۱ نیروهای جسم

۳۱۲	۲-۴-۴-۹ نیروهای انقباضی
۳۱۳	۳-۴-۴-۹ نیروهای متمرکز
۳۱۳	۵-۴-۹ برنامه‌های کامپیوتری با استفاده از مثلث کرنشی ثابت
۳۱۴	۱-۵-۴-۹ آماده کردن داده‌ها
۳۱۶	۲-۵-۴-۹ مختصات گره‌ای
۳۱۶	۳-۵-۴-۹ پیوستگی المان
۳۱۶	۴-۵-۴-۹ خواص ماده
۳۱۷	۵-۵-۴-۹ شرایط مرزی
۳۱۷	۶-۵-۴-۹ بارگذاری
۳۱۷	۷-۵-۴-۹ برنامه اصلی
۳۱۹	۸-۵-۴-۹ ماتریس سختی المان
۳۲۰	۹-۵-۴-۹ اسمبل ماتریس سختی کلی
۳۲۰	۱۰-۵-۴-۹ راه‌حل سیستم کلی معادلات
۳۲۰	۱۱-۵-۴-۹ جابجایی‌های گره‌ای
۳۲۰	۱۲-۵-۴-۹ تنش‌ها و کرنش‌های المان
۳۲۰	۱۳-۵-۴-۹ نتایج و بحث
۳۲۳	۱۴-۵-۴-۹ برنامه ایجاد خودکار مش‌بندی
۳۲۸	۶-۴-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از CST
۳۲۸	۱-۶-۴-۹ نسخه تعاملی
۳۳۷	۲-۶-۴-۹ نسخه کلمات کلیدی
۳۴۱	۵-۹ مثلث کرنشی خطی
۳۴۲	۱-۵-۹ حوزه جابجایی
۳۴۳	۲-۵-۹ ماتریس کرنشی
۳۴۴	۳-۵-۹ ماتریس سختی
۳۴۴	۴-۵-۹ برنامه کامپیوتری: LST_PLANE_STRANE_MESH
۳۴۸	۱-۴-۵-۹ انتگرال‌گیری عددی از ماتریس سختی
۳۵۰	۲-۴-۵-۹ محاسبه تنش‌ها و کرنش‌ها
۳۵۰	۵-۵-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از LST
۳۵۰	۱-۵-۵-۹ نسخه تعاملی
۳۵۸	۲-۵-۵-۹ نسخه کلمات کلیدی
۳۵۹	۶-۹ چهارضلعی دوسویه

۳۵۹	۱-۶-۹ حوزه جابجایی
۳۶۱	۲-۶-۹ ماتریس کرنشی
۳۶۳	۳-۶-۹ ماتریس سختی
۳۶۳	۴-۶-۹ بردار نیروی المان
۳۶۴	۵-۶-۹ برنامه کامپیوتری: PLANE_STRESS.m_Q۴
۳۶۵	۱-۵-۶-۹ آماده‌سازی داده‌ها
۳۶۷	۲-۵-۶-۹ برنامه اصلی
۳۷۰	۳-۵-۶-۹ انتگرال‌گیری ماتریس سختی
۳۷۱	۴-۵-۶-۹ محاسبه تنش‌ها و کرنش‌ها
۳۷۲	۵-۵-۶-۹ برنامه ایجاد خودکار شبکه
۳۷۷	۶-۶-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از چهارضلعی Q۴
۳۷۷	۱-۶-۶-۹ نسخه تعاملی
۳۸۶	۲-۶-۶-۹ نسخه کلمات کلیدی
۳۹۰	۷-۹ چهار ضلعی هشت گره‌ای
۳۹۰	۱-۷-۹ فرمول نویسی
۳۹۲	۲-۷-۹ نیروهای گره‌ای معادل
۳۹۲	۳-۷-۹ برنامه PLANE_STRESS.m_Q۸
۳۹۲	۱-۳-۷-۹ آماده‌سازی داده‌ها
۳۹۷	۲-۳-۷-۹ برنامه اصلی
۳۹۹	۳-۳-۷-۹ انتگرال‌گیری ماتریس سختی
۳۹۹	۴-۳-۷-۹ نتایج بدست آمده با مش درشت
۴۰۱	۵-۳-۷-۹ برنامه‌ای برای ایجاد خودکار مش
۴۰۱	۴-۷-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از چهارضلعی Q۸
۴۱۳	۸-۹ مسایل حل شده با MATLAB
۴۱۳	۱-۸-۹ ستون نواری با المان CST
۴۱۸	۲-۸-۹ پایه نواری با المان LST
۴۲۴	۳-۸-۹ پایه پل با المان Q۸
۴۴۱	فصل دهم مسایل تقارن محوری
۴۴۳	۱-۱۰ تعریف
۴۴۳	۲-۱۰ رابطه کرنش-جابجایی
۴۴۳	۳-۱۰ روابط تنش-کرنش

۴۴۵	۴-۱۰ فرمول بندی المان محدود
۴۴۵	۱-۴-۱۰ حوزه جابجایی
۴۴۶	۲-۴-۱۰ ماتریس کرنشی
۴۴۶	۳-۴-۱۰ ماتریس سختی
۴۴۶	۴-۴-۱۰ بردارهای نیروی گره‌ای
۴۴۶	۱-۴-۱۰ نیروی چشم
۴۴۶	۲-۴-۱۰ بردار نیروی سطحی
۴۴۷	۳-۴-۱۰ بارهای متمرکز
۴۴۷	۴-۴-۱۰ مثال
۴۴۸	۵-۱۰ برنامه نویسی
۴۵۰	۱-۵-۱۰ برنامه کامپیوتری: m.AXI_SYM_T۶
۴۵۴	۱-۱-۵-۱۰ انتگرال گیری عددی ماتریس سختی
۴۵۵	۲-۱-۵-۱۰ نتایج
۴۵۷	۲-۵-۱۰ برنامه نویسی کامپیوتری: m.AXI_SYM_Q۸
۴۶۱	۱-۲-۵-۱۰ انتگرال گیری عددی از ماتریس سختی
۴۶۵	۶-۱۰ تحلیل در آباکوس با استفاده از چهارضلعی هشت گره‌ای
۴۷۱	فصل یازدهم صفحات ضخیم و نازک
۴۷۳	۱-۱۱ مقدمه
۴۷۳	۲-۱۱ صفحات باریک
۴۷۳	۱-۲-۱۱ معادلات دیفرانسیل صفحات تحت بارگذاری خمش
۴۷۷	۲-۲-۱۱ معادله حاکم بر حسب متغیرهای جابجایی
۴۷۸	۳-۱۱ تئوری صفحه ضخیم یا تئوری صفحه مایدلین
۴۷۹	۱-۳-۱۱ روابط تنش-کرنش
۴۸۰	۴-۱۱ تحلیل المان محدود الاستیک خطی صفحات
۴۸۰	۱-۴-۱۱ فرمولسازی اجزاءمحدود برای صفحات نازک
۴۸۱	۱-۱-۴-۱۱ المان مثلثی
۴۸۲	۲-۱-۴-۱۱ المان مستطیلی
۴۸۴	۲-۴-۱۱ فرمول بندی المان محدود برای صفحات ضخیم
۴۸۶	۵-۱۱ شرایط مرزی
۴۸۶	۱-۵-۱۱ لبه با تکیه‌گاه ساده
۴۸۷	۲-۵-۱۱ لبه یا حاشیه اتصالی

۴۸۸	۳-۵-۱۱ لبه یا حاشیه آزاد
۴۸۸	۶-۱۱ برنامه کامپیوتری برای صفحه ضخیم با استفاده از چهارضلعی هشت گره‌ای
۴۸۸	۱-۶-۱۱ برنامه اصلی: m.Thick_plate_Q8
۴۹۳	۲-۶-۱۱ آماده‌سازی داده‌ها
۴۹۳	۱-۲-۶-۱۱ ماتریسهای سختی
۴۹۴	۲-۲-۶-۱۱ شرایط مرزی
۴۹۴	۳-۲-۶-۱۱ بارگذاری
۴۹۶	۴-۲-۶-۱۱ انتگرال‌گیری عددی از ماتریس سختی
۴۹۷	۳-۶-۱۱ نتایج
۴۹۷	۱-۳-۶-۱۱ تعیین ممان‌ها و نیروهای برشی
۴۹۸	۲-۳-۶-۱۱ کانتور
۴۹۹	۷-۱۱ تحلیل با آباکوس
۴۹۹	۱-۷-۱۱ مقدمات
۵۰۰	۱-۱-۷-۱۱ shell سه-بعدی
۵۰۰	۲-۱-۷-۱۱ shell تقارن محوری
۵۰۰	۳-۱-۷-۱۱ shell قراردادی ضخیم در مقابل نازک
۵۰۱	۲-۷-۱۱ صفحه با تکیه‌گاه ساده
۵۰۸	۳-۷-۱۱ shell های سه-بعدی
۵۲۳	ضمیمه الف لیست توابع و مدول MATLAB
۵۴۹	ضمیمه ب نیروهای گره‌ای معادل استاتیکی

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیش‌گفتار

بدیهی است که در حوزه روش‌های محاسباتی در طی قرن اخیر، روش اجزاءمحدود یکی از مهم‌ترین دستاوردها بوده‌است. بطور تاریخی منشا این روش تحلیل ساختارهای فضایی قالب‌بندی شده با وزن بحرانی است. این ساختارهای شکل گرفته به عنوان مجموعی از اعضای تک بعدی در نظر گرفته می‌شوند، که راه‌حل دقیق معادلات دیفرانسیل آنها برای هر عضو به خوبی شناخته شده‌است. این راه‌حل‌ها به شکل رابطه ماتریسی بین نیروها و جابجایی‌ها در دو انتهای هر عضو ارائه می‌شوند. به همین دلیل این روش در ابتدا تحلیل ماتریسی سازه‌ها نام داشت. بعدها این راه‌حل گسترش یافته و تحلیل سازه‌های پیوسته را نیز شامل گردید. چون سازه‌های پیوسته هندسه‌های پیچیده‌ای دارند، بنابراین این سازه‌ها به اجزاء سازه‌ای یا «المان‌ها» تقسیم شدند که در گره‌ها به هم وصل می‌شوند. در این مرحله در توسعه این روش بود که اصطلاح «اجزاءمحدود» پدیدار گردید. اگر چه برخلاف سازه‌های قالب‌بندی شده، راه‌حل‌های فرم‌بسته برای معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار المان‌های پیوسته، دیگر قابل استفاده نبودند. برای ایجاد رابطه ماتریسی بطور عددی بین نیروها و جابجایی‌ها اینتریولاسیون در گره‌ها، اصول انرژی (از جمله تئوری کارمجازی یا اصل حداقل انرژی پتانسیل) که به خوبی شناخته شده‌اند با اینتریولاسیون چند جمله‌ای piece-wise در یک جابجایی مجهول مورد استفاده قرار گرفتند. در اواخر دهه ۱۹۶۰ که مشخص شد که این روش معادل یک روش کمینه‌سازی است، این روش به شکل باقیمانده وزنی و حساب تغییراتی مجدداً فرمول‌نویسی گردید و استفاده از آن به شبیه‌سازی مسایل غیرسازه‌ای در مایعات، ترمومکانیک و الکترومغناطیس بسط یافت. اخیراً نیز در فیزیک کاربردهای چندگانه‌ای پیدا کرده‌است. برای مثال با این روش می‌توان اثرات دما بر خواص الکترومغناطیسی را بررسی کرد که بر عملکرد موتورهای الکتریکی می‌تواند تاثیر داشته باشد.

۲-۱ تحلیل اجزاءمحدود و کاربر

امروزه در طراحی سازه‌های همه سازه‌های ساده، اکثراً با استفاده از روش اجزاءمحدود تحلیل می‌شوند. وقتی مهندسان سازه فارغ التحصیل شده و وارد شرکت طراحی می‌شوند، با نرم‌افزارهای پیشرفته تجاری

اجزاء محدودی روبرو می‌گردند که قابلیت‌ها و تئوری‌های سازنده آن بسیار فراتر از مطالبی است که آن‌ها در دوران تحصیل خود آموزش دیده‌اند. در واقع نرم‌افزارهای اجزاء محدودی که در حال حاضر در بازار است می‌تواند غیرخطی بودن ماده‌ای با هندسه، تماس، اندرکنش سازه با مایعات، شکل‌دهی فلز، شبیه‌سازی تصادفات و غیره را شبیه‌سازی نماید. همچنین نرم‌افزارهای موجود در بازار قابلیت‌های پردازش قبلی و بعدی پیشرفته‌ای هم دارند. در اکثر موارد اینها تنها اجزایی هستند که کاربر با آنها کار می‌کند و نکته مهم آموختن نحوه کار با آنهاست که معمولاً فرآیند آزمون و خطایی است که با مستندسازی به کمک نرم‌افزار انجام می‌شود. اما کسب مهارت در استفاده از پردازش گره‌ای قبلی و بعدی هیچ ارتباطی به دقت نتایج ندارد. پردازشگر فقط وسیله‌ایست است برای راحت‌تر کردن وارد نمودن داده‌ها، چون روش اجزاء محدود نیازمند مقدار بسیار عظیمی از داده‌های ورودی است در حالیکه از سوی دیگر پردازشگر وسیله‌ای است برای نشان دادن کانتور نتایج که خطوط فاصله مشخصی از هم دارند. کاربر باید بتواند تشخیص دهد که هدف اصلی تحلیل چیزی است که بین دو فرآیند ورود و خروج اتفاق می‌افتد. برای کسب مهارت و تخصص در تحلیل اجزاء محدود، کاربر باید درک کند که در این بخش الزامی چه اتفاقی می‌افتد، که به آن «جعبه سیاه» هم گفته می‌شود. این مهارت فقط پس از سال‌ها کار میدانی حاصل می‌گردد که شامل تکنولوژی FEA هم می‌گردد (معادلات دیفرانسیل، تحلیل عددی و جبر بردار). آموزش رسمی فرآیندهای عددی و جبر ماتریسی مورد استفاده در روش اجزاء محدود، برای کاربر مفید خواهد بود مخصوصاً اگر وی یکی از مهندسان طراحی باشد که از تکنیک و روش اجزاء محدود در کار خود استفاده می‌کنند بدون آنکه قبلاً فرآیندهای عددی مربوطه را آموخته باشند.

۱-۳ هدف از نگارش این کتاب

همه کتاب‌هایی که تئوری اجزاء محدود و یا کاربردهای مهندسی را توضیح می‌دهند را می‌توان به دو گروه طبقه‌بندی کرد، دسته اول آنهایی هستند که با تئوری سروکار دارند، با فرض اینکه خواننده نوعی از نرم‌افزار را در اختیار دارد و دسته دوم آنهایی که با جنبه برنامه‌نویسی آن سروکار دارند با فرض اینکه خواننده در زمینه دانش تئوری این روش اطلاعاتی آموخته است. هدف این کتاب این است که این شکاف را پر کند. در این کتاب تئوری روش اجزاء محدود طوری معرفی می‌گردد که بین فرمولاسیون ریاضی، اجرای برنامه و کاربرد آن با استفاده از نرم‌افزار موجود در بازار تعادل برقرار باشد. مراحل کلیدی با جزئیات کامل شرح داده شده‌اند. اجرای کامپیوتری برنامه با استفاده از MATLAB انجام می‌شود، در حالیکه کاربردهای عملی هم در MATLAB و هم در Abaqus اجرا می‌گردند. MATLAB برنامه‌ای با سطح بالایی در زبان برنامه‌نویسی است که مختص کار با ماتریس‌ها طراحی شده است. این ویژگی برنامه MATLAB را برای برنامه‌ریزی روش اجزاء محدود مناسب کرده است. بعلاوه برنامه MATLAB باعث می‌شود خواننده بتواند از طریق کم کردن وسعت برنامه‌نویسی به روش اجزاء محدود متمرکز شود. تجربه نشان می‌دهد که کتاب‌هایی که نمونه‌های برنامه‌نویسی دارند برای مبتدیان بسیار مفید هستند. اما باید متذکر شد که این کتاب درباره نوشتن نرم‌افزار برای حل مسئله خاصی نیست بلکه این کتاب درباره تدریس اصول اولیه

روش اجزاءمحدود می‌باشد. اگر خواننده تمایل دارد مسایل واقعی را حل کند، بهتر است از نرم‌افزارهای موجود در بازار استفاده نماید تا اینکه برای خود کدنویسی کند، نرم‌افزاری که فرد خود می‌نویسد شاید اشکالات عمده‌ای داشته باشد که می‌تواند موجب تحلیل ضعیف و ناقص نتایج گردد، در حالیکه نرم‌افزار موجود در بازار علیرغم کیفیت توانایی‌های پردازش قبل و بعد در نرم‌افزار سابقه موثر و تایید شده‌ای دارد که از آن پشتیبانی می‌نماید. این بدان معنی است که کاربر با برنامه‌نویسی شخصی می‌تواند نقاط ضعف و قوت خود را تشخیص دهد ولی نرم‌افزارهای موجود در بازار به نوعی قابلیت یافتن خطا در نرم‌افزار را آنچنان در اختیار کاربر قرار نمی‌دهند. به همین منظور فرآیندهای کلیدی برای حل مسایل بصورت پله‌ای و مرحله‌به‌مرحله با دخالت Abaqus و ویرایش‌های لغات کلیدی در این کتاب ارائه شده‌اند. Abaqus دارای کدهای اجزاءمحدود مناسبی است که در حال حاضر در بازار موجود است. این نرم‌افزار محتوی موارد زیر است. Abaqus استاندارد که نرم‌افزار کلی و هدف روش اجزاءمحدود می‌باشد، Abaqus Explicit برای تحلیل دینامیکی.

در حال حاضر این نرم‌افزار در اختیار Dassault Systems بوده و بخشی از محصولات SIMULIA به حساب می‌آید، http://www.simulia.com/products/unified_fea.html ورود داده‌ها برای تحلیل اجزاءمحدود با Abaqus به هر دور روش Abaqus/CAE یا CATIA امکان‌پذیر است، که رابط‌های بصری کاربر گرافیکی هستند. کاربر می‌تواند با وجود آنها نتایج را هم مشاهده و هم کنترل نماید. می‌توان داده‌ها را وارد کرد یا از یک فایل ورودی آماده استفاده نمود که یک ویرایشگر متنی دارد و از طریق خط دستور اجرا می‌شود و یا متنی را به کاربرد که با پایتون Python آماده شده است. پایتون یک زبان برنامه‌نویسی موضوع محور است و در Abaqus بصورت Abaqus Pathon حاضر است. این مورد اخیر گزینه پیشرفته‌ای است که مخصوص کاربران مجرب می‌باشد و در این کتاب مطرح نمی‌شود ولی در جلد دوم و سوم از همین کتاب به طور مفصل به این مورد پرداخته شده و با استفاده از لینک متلب، آباکوس و پایتون و الگوریتم‌های بهینه‌سازی همچون الگوریتم ژنتیک به بحث جامع کاربردی و بسیار مفیدی خواهیم پرداخت.

۴-۱ ساختار کتاب

ساختار کتاب با تاریخچه ایجاد روش اجزاءمحدود آغاز می‌شود پس از مطرح شدن مطالب مقدماتی در فصل ۱، در فصول ۲ تا ۴، تحلیل سازه‌ای ماتریس‌ها برای خرپاها، تیرها و قاب‌ها معرفی می‌گردد. روابط ماتریسی بین نیروها و جابجایی‌های گره‌ای برای هر نوع المان با استفاده از روش‌های مستقیم برای مکانیک‌های سازه‌ای به دست می‌آیند. در فصل ۱ با استفاده از خرپا به عنوان نمونه مراحل مختلف مورد نیاز برای برنامه روش اجزاءمحدود بطور مختصر توضیح داده می‌شوند از جمله: شرح دادن بارها، تکیه‌گاه‌ها، مصالح، آماده‌سازی مش‌بندی، دست‌کاری ماتریس، معرفی شرایط مرزی و حل معادله. البته یک خرپا همه ویژگی‌های لازم برای نشان دادن برنامه‌نویسی یک برنامه اجزاءمحدود را داراست. برنامه‌ها و دستورات عمل‌های مشابه برای تیرها و قاب‌های صلب هم به ترتیب در فصل‌های ۳ و ۴ مطرح می‌شوند. فرآیندهایی که در هر فصل توضیح داده می‌شوند در پایان فصل به صورت کدهای MATLAB اجرا

می گردند. بعلاوه در پایان هر فصل جزییات فرآیندهای مرحله به مرحله برای حل مسایل با فرآیند تعاملی Abaqus interactive و ویرایش کلمات کلیدی (keyword) نیز آمده است.

فصل ۵ تغییر فلسفه بین تحلیل سازه های ماتریس و تحلیل اجزاء محدود در یک زنجیره را بررسی می کند. در تحلیل ماتریسی تنها یک فشار غالب وجود دارد، که یک فشار مثلا فشار طولی می باشد. از سوی دیگر در یک زنجیره در یک نقطه فشارها و کشش های زیادی وجود دارد. فصل ۵ تئوری های تنش و کرنش را معرفی می کند و رابطه بین آنها را توضیح می دهد. در این فصل مسایل حل شده زیادی وجود دارند که به خواننده کمک می کند تا تئوری های مطرح شده را درک کند. در فصل های ۶ و ۷ به ترتیب روش های باقیمانده وزنی و تقریب اجزاء محدود مطرح می گردند که انواع مختلف المان های زنجیره ای و تکنیک های مختلف مورد استفاده برای ساختن انتروپولاسیون های چند جمله ای Piece-wise در مقادیر مجهول را مورد بحث قرار می دهند. برای برقراری ارتباط ماتریس بین نیروها و جابجایی های گره ای در عناصر زنجیره ای با هندسه پیچیده و آنهایی که رفتارشان تحت هم زمانی معادلات دیفرانسیلی است (و نیز آنهایی که معادلات حاکم بر آنها معادلات دیفرانسیلی هستند) دانستن این روش ها ضروری است چون راه حل های فرم بسته را نمی توان به راحتی برای آنها بکار برد.

فصل ۸ بطور کامل به انتگرال گیری عددی با استفاده از Gauss Legendre و فرمول های Hammer می پردازد که در پایان فصل هم مثال های زیادی آورده شده اند. بدیهی است در طی اجرای روش اجزاء محدود انتگرال های زیادی به وجود می آیند که در فصول ۹ تا ۱۱ مشاهده خواهیم کرد. وقتی تعداد عناصر زیاد باشد و یا شکل هندسی آنها یکی باشد، که در بسیاری از کاربردها هم به همین صورت است، استفاده از انتگرال گیری تحلیلی طاقت فرسا می شود و برای برنامه نویسی کامپیوتری مناسب نخواهد بود. در فصل ۹ فرمولاسیون اجزاء محدود برای مسایل تنش و کرنش صفحه ای بیان می گردد. جزییات مربوط به ماتریس سختی برای المان های مثلثی و چهارضلعی مشخص می شوند که پس از آن خواننده می تواند انواع زیادی از مسایل را حل کند. همچنین این فصل مسایل زیادی دارد که از طریق MATLAB و Abaqus حل شده اند. فصل ۱۰ به معرفی مسایل تقارن محوری می پردازد در حالیکه فصل ۱۱ به تئوری صفحات اختصاص داده شده است. ماتریس های سختی برای اغلب المان ها با جزییات کامل مطرح شده اند و در پایان هر فصل مثال های زیادی را مشاهده می کنید که با MATLAB و Abaqus حل می شوند. ضمائم و آدرس اینترنتی <http://www.crcpnss.com/product/isbn9781466580206> همه برنامه های MATLAB که در مثال ها مورد استفاده قرار گرفته اند را دارا هستند.

فصل دوم

المان

۱-۲ مقدمه

برای نشان دادن مراحل که در تحلیل یک مسئله اجزاء محدود دخالت دارند، تحلیل یک خرپای ساده می‌تواند بهترین روش باشد. در واقع خرپا اولین سیستم سازه‌ای است که در دوره‌های مربوط به دروس مهندسی معرفی می‌گردد. در سال اول دانشجو در استاتیک مهندسی با خرپا آشنا می‌شود. با آشنایی با یک خرپا همه ویژگی‌های لازم برای نشان دادن یک تحلیل محدود، بدون نیاز به ابزار پیشرفته ریاضی (از جمله انتگرال گیری عددی و تبدیل‌های هندسی که برای تحلیل سازه‌های پیچیده به کار می‌روند) آموخته می‌شود. یک خرپا سازه‌ای است متشکل از عضوهای محوری که با اتصالات مفصلی به هم وصل شده‌اند که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. فرض در این است که بارهای وارد بر خرپا در اتصالات متمرکز می‌شوند. قسمت‌های مختلف یک خرپا از طریق نیروی محوری بار خارجی را پشتیبانی می‌کنند بطوریکه دچار خمش و تغییر شکل نشوند. بنابراین در هیچ یک از قسمت‌های سازه ممان خمشی یا حرکت خمشی وجود نخواهد داشت.

۲-۲ المان خرپای یک بعدی

۱-۲-۲ فرمول بندی ماتریس سختی: روش مستقیم

یک عضو از یک خرپا ساده‌ترین المان صلب سازه‌ایست، یعنی یک میله انعطاف‌پذیر با دو انتهای ۱ و ۲ است که از این پس آنها را گره می‌نامیم. المانی که در شکل الف ۲-۲ نشان داده شده است را در نظر بگیریم. داریم، طول المان L ، سطح مقطع A ، که به صورت خطی از ماده‌ای انعطاف‌پذیر ساخته شده و مدول یانگ آن E است. اگر نیروی نرمال N_1 را بر گره ۱ وارد کنیم و در همان زمان گره ۲ را در فضا ثابت نگه داریم، بطوریکه در شکل ب ۲-۲ نشان داده شده است میله به مقدار u_1 کوتاه می‌گردد.

$$N_1 = \frac{AE}{L} u_1 \quad (1-2)$$

با توجه به ویژگی قانون سوم نیوتن، باید نیروی واکنشی R_2 در گره ۲ (از نظر مقدار) برابر و (از نظر جهت) عکس نیروی N_1 باشد؛ یعنی:

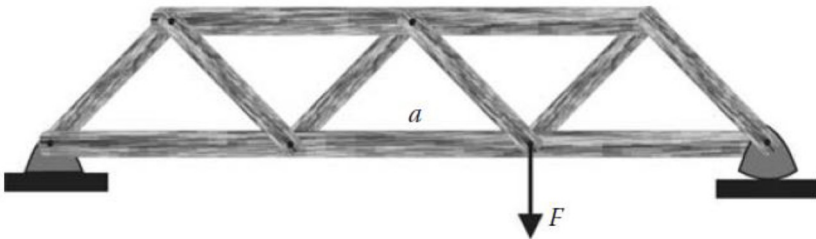
$$R_2 = -\frac{AE}{L}u_1 \quad (2-2)$$

همچنین اگر نیروی نرمال N_2 را در همان زمانیکه گره ۱ در فضا ثابت است وارد کنیم، میله به مقدار u_2 طولیل تر می شود (افزایش طول خواهد داشت) که در شکل ج ۲-۲ نشان داده شده است. به همین ترتیب نیروی N_2 ثابت فنر به جابجایی u_2 مربوط می شود.

$$N_2 = \frac{AE}{L}u_2 \quad (3-2)$$

در اینجا هم با توجه به ویژگی قانون سوم نیوتن، باید نیروی واکنشی R_1 در گره ۱ (از نظر مقدار) برابر و (از نظر جهت نیروی N_2) باشد، یعنی:

$$R_1 = -\frac{AE}{L}u_2 \quad (4-2)$$



شکل ۲-۱ ساختار خرپا

وقتی میله تحت خاصیتی که در ۱ مدل سوپریپوزیشن است در معرض نیروهای N_1 و N_2 قرار بگیرد، نیروهای کل F_1 و F_2 که در شکل ۲-۲ نشان داده شده اند عبارت خواهد بود از